

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Penelitian Terdahulu

Teknologi *Finite Element Analysis* (FEA) banyak digunakan karena efektif untuk memodelkan dan mensimulasikan suatu mekanika yang terjadi pada suatu model atau objek. FEA banyak diaplikasikan pada industri pesawat terbang dan perpipaan dalam dunia Teknik Permesinan. Penelitian dengan metode FEA, terutama pada kasus mekanika kontak antara kaki manusia dengan *insole* telah dilakukan dan dilaporkan oleh beberapa peneliti, seperti : D. Lemmon, dkk. (1997), JTM. Cheung, dkk. (2004 & 2005); S. Goske, dkk. (2006); TX. Qiu, dkk. (2011). Penelitian yang mereka lakukan lebih membahas mengenai mekanika kontak kaki normal, dalam arti telapak kaki yang diteliti tidak mengalami deformasi struktur tulang pada bagian telapak kaki, terutama pada jaringan padat (*Ligamen*) yang berada di sepanjang telapak kaki dan menghubungkan tulang jari-jari ke tulang tumit yang dikenal dengan istilah *Plantar Fascia*.

Deformasi pada bagian ini merupakan gejala yang tidak normal yang sering disebut dengan *Deformities*. *Deformities* ini meliputi *Flat Feet*, *Pronation*, *Neuroma*, *Plantar Fasciitis*, dan *Diabetes* (Delcam Healthcare Solution, 2014). Kelainan ini memiliki hubungan yang sangat erat dengan persebaran tekanan yang dialami oleh *Plantar Fascia* terhadap alas kaki yang digunakan (Holewsky, 1989 & Xiuzi. Y, 2008). Hal tersebut diakibatkan oleh penggunaan sepatu yang tidak sesuai dengan kontur telapak kaki manusia. Solusi dari permasalahan ini adalah membuat *Insole Shoe Orthotic (iso_diabetes)* yang menyesuaikan dengan kontur telapak kaki manusia yang memiliki permasalahan tersebut di atas.

Penelitian mengenai FEA dalam bidang *Industrial Engineering*, terutama di Fakultas Teknologi Industri Universitas Atma Jaya Yogyakarta, pernah dilakukan sebelumnya oleh Y.V. Untoro (2015) dan Fransiskus A.C. Gunawan (2016).

Penelitian yang pernah dilaporkan oleh Y.V. Untoro (2015) membahas mengenai mekanika kontak antara material *Silicone Rubber Castaldo Gellato Fuschea* (SRCGF) sebagai media yang ditekan dengan S45C sebagai *indenter* yang menekan. Dalam penelitian tersebut, material yang digunakan sebagai media masih dalam satu *family* yang sama yaitu *Elastomers*, secara lebih spesifik material karet SRCGF. Berdasarkan hasil dari penelitian yang dilakukan dengan

software Abaqus, diperoleh pemodelan tekan pada SRCGF dengan *Flat Indenter* S45C yang dibuat *Rigid Body* untuk menyesuaikan kondisi yang terdapat pada mesin vulkanisir untuk aplikasi *Spin Casting*. Selain itu, kontur dan tegangan maksimal ketika terjadi kontak antara *Flat Indenter* dan material *Viscoelastic* dihasilkan dalam bentuk kurva.

A.C. Gunawan (2016) melakukan mekanika kontak pada proses *Manufacturing Insole Shoe Orthotic* berbahan *EVA Rubber Foam*. Selama ini proses pengerjaan *Insole Shoe Orthotic* masih bersifat konvensional, di mana saat proses permesinan berlangsung terjadi kontak antara alat potong *Ballnosed Cutter HSS* dengan material *EVA Rubber Foam* yang menghasilkan produk yang tidak presisi. Hasil penelitian yang didapatkan menggunakan *software* Abaqus 6.13 berupa pemodelan tekanan *EVA Rubber Foam* dengan *Indenter Ballnosed Cutter HSS* yang dibuat *Rigid Body* untuk mengkondisikan sesuai dengan proses permesinan yang sebenarnya, dan hasil analisis tegangan yang dialami oleh *EVA Rubber Foam* diolah dalam bentuk kurva.

Penelitian yang dilakukan oleh JTM. Cheung (2005) membahas mengenai *3-Dimensional Finite Element Model of the Human Foot and Ankle for Insole Design*. Tujuan penelitian yang dilakukan adalah untuk mengetahui pengaruh kekakuan material dua buah *Insole*, pertama dengan proses *manufacturing Custom-Molded* dengan *Insole* datar pada tekanan *Plantar Fascia* dan distribusi tegangan yang terjadi di tulang dan ligamen selama berdiri tegak. Hasil dari penelitian mengatakan bahwa *Insole* dengan proses *Custom-Molded* yang memiliki bentuk menyesuaikan dengan kontur telapak kaki manusia lebih baik dalam mengurangi tekanan yang terjadi di dalam *Plantar Fascia*.

Penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh JTM. Cheung (2004) memiliki fokus penelitian yang hampir sama dengan penelitian yang dilakukan pada tahun 2005. Peneliti ingin mengetahui tekanan dan distribusi tegangan yang terjadi di *Plantar Fascia* dan ligamen ketika berdiri tegak, hanya saja pada penelitian ini kaki tidak memijak *Insole*, melainkan permukaan tanah. *Software* FEA yang digunakan dalam penelitian ini adalah Abaqus. Hasil dari penelitian ini adalah diketahui adanya peningkatan kekakuan jaringan yang ditandai dengan adanya area kritis tekanan pada *Plantar Fascia* yang terjadi di bagian kaki depan dan kaki belakang / tumit.

WP. Chen (2003) melakukan FEA untuk menyelidiki efek yang terjadi pada redistribusi tegangan di *Plantar Fascia* ketika terjadi kontak dengan *Insole*. Terdapat dua *Insole* yang digunakan dalam penelitian ini, hanya saja keduanya berbeda dari segi kombinasi material penyusunnya. Dikatakan bahwa banyak rancangan mengenai *Insole* saat ini untuk mengurangi tekanan pada *Plantar Fascia* untuk pasien *Diabetes*. Namun, desainnya sebagian besar sama dan sedikit tersedianya bukti ilmiah untuk dijadikan pedoman penerapan produk tersebut bagi para pasien. Hasil penelitian menunjukkan bahwa area tegangan tertinggi (kritis) dan tegangan normal rata-rata berkurang di sebagian besar daerah *Plantar Fascia* kecuali pada bagian telapak kaki tengah (*mid-foot*). Area kritis tersebut kemudian dibandingkan ketika seseorang menggunakan *Insole* yang tidak memiliki kontur (rata). Hasil FEA menunjukkan bahwa dua set *Insole* yang digunakan dalam penelitian ini dapat mengurangi tekanan tinggi di daerah tumit dan mendistribusikan tekanan ke daerah *mid-foot* saat dibandingkan dengan *Insole* datar (*Flat Insole*).

S. Goske (2006) juga melakukan penelitian dengan menggunakan metode FEA, hanya saja fokus yang dihadapi adalah sakit pada bagian tumit (*Heel Pain*). Selama ini banyak bermunculan produk *Insole* yang dirancang untuk mengurangi *stress* yang terjadi pada *Plantar Fascia*. Perancangan produk tersebut sering kali dilakukan secara intuitif dan tidak bergantung pada pedoman ilmiah. Dalam penelitian ini diselidiki 27 desain *Insole*. Produk tersebut didesain sedemikian rupa dengan 3 ketebalan yang berbeda (6.3, 9.5, dan 12.7 mm), material yang berbeda (*Poron Cushioning*, *Microcel Puff Lite*, dan *Microcel Puff*) dan terbagi menjadi 3 kategori, yaitu *Flat Insole*, setengah kontur (*Half Conforming*) dan kontur penuh sesuai dengan kontur telapak kaki manusia (*Full Conforming*). Kesesuaian produk adalah variabel yang paling penting, sedangkan tekanan relatif tidak memiliki pengaruh terhadap pemilihan material. Pengurangan tekanan meningkat hingga 44% untuk kategori *Full Conforming Insole* jika dibandingkan dengan *Flat Insole* dan *Half Conforming Insole*.

2.2. Penelitian Sekarang

Penelitian yang dilakukan oleh Y.V. Untoro (2015) dan A.C. Gunawan (2016) dengan bantuan analisis CAE Abaqus 6.13 hanya baru pada tahap verifikasi desain *Mold Spin Casting* dan proses *Manufacturing EVA Rubber Foam dua layer* dalam bentuk gambar 2D. Penelitian kali ini akan membahas mengenai FEA untuk

Insole Shoe Orthotic sebagai media yang ditekan oleh *Plantar Fascia* yang berperan sebagai indenter yang melakukan penekanan terhadap media uji. Indenter tidak dibuat dalam bentuk *Rigid Body* seperti yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Perbedaan mendasar terletak pada model yang akan di analisis. Pada penelitian kali ini, analisis *Finite Element* akan dilakukan pada model 3D yang terdiri dari bentuk kaki pasien *Diabetes* dan *Insole Shoe Orthotic* yang bentuknya telah disesuaikan dengan bentuk kontur dari telapak kaki pasien *diabetes*.

Proses *manufacturing insole shoe orthotic* masih menggunakan teknologi konvensional maka masih memiliki kemungkinan produk tersebut kurang presisi. Penelitian ini juga akan membahas berapakah toleransi ukuran yang optimal dan memiliki distribusi tekanan dan tegangan yang paling kecil pada *insole shoe orthotic* berbahan *EVA Rubber Foam*. Penelitian ini nantinya akan menjadi *input* untuk penelitian lainnya yang berhubungan dengan proses *manufacturing insole shoe orthotic*.

Kebanyakan penelitian yang dilakukan bertujuan untuk membuktikan bahwa produk yang mengikuti kontur telapak kaki manusia semakin baik untuk kesehatan, dalam kajian *Orthotics, Prosthetics, Medical Engineering*, dan *Biomechanics*. Hal tersebut telah dibuktikan melalui hasil penelitian dan jurnal ilmiah yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti di atas. Dalam kajian ilmu tersebut, penelitian lebih berfokus pada bagaimana mengurangi distribusi tekanan dan tegangan yang terjadi pada *Plantar Fascia*. Penelitian sekarang, peneliti berusaha untuk mencari variasi produk yang optimal dengan melihat distribusi tekanan dan tegangan yang dialami oleh *insole shoe orthotic* dalam kajian optimasi desain *Industrial Engineering* dengan dasar penelitian terdahulu sehingga menjadi suatu kelanjutan yang nantinya akan dapat dikembangkan menuju proses *manufacturing* desain *insole shoe orthotic* yang optimal.

2.3. Computer Aided Engineering (CAE)

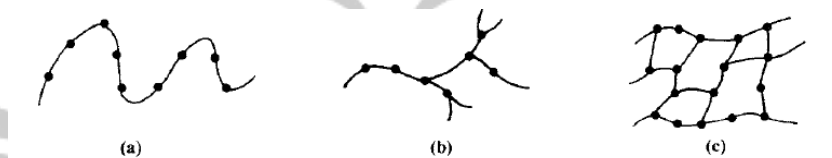
Computer Aided Engineering (CAE) meliputi penggunaan komputer di semua kegiatan desain untuk pembuatan suatu produk (Cranfield University, 2016). Penggunaan CAE meliputi desain, menganalisis proses dan memproduksi produk. Artinya, *Computer Aided Design* (CAD) dan *Computer Aided Manufacturing* (CAM) juga termasuk ke dalam CAE (M. Rouse, 2005).

2.4. Finite Element Analysis (FEA)

Finite Element Analysis (FEA) adalah cabang dari mekanika teknik. Merupakan sebuah metode numerik yang sekarang ini digunakan untuk menganalisis suatu struktur tertentu, mekanika, dinamika, *Thermal Analysis*, *Electrical Analysis* pada suatu material tertentu dan geometri tertentu, bahkan *Biomaterials* dan *Biomechanical* pada organ tubuh manusia. FEA dikembangkan untuk memecahkan permasalahan mekanika teknik yang dapat dilakukan dengan menggunakan suatu *software* komputer. Permasalahan utama mekanika teknik adalah munculnya persamaan yang terlalu sulit untuk dikerjakan. Peran FEA dalam menghadapi permasalahan tersebut adalah sebagai suatu metode numerik yang memberikan simulasi dan permodelan untuk mencapai solusi yang mendekati titik optimal atau disebut “*Approximate Solution*” (H. Jerry, 2006).

2.5. Polymers

Polimer adalah molekul makro (*Macromolecule*) dari massa molekul tinggi yang tersusun dari molekul yang lebih kecil, disebut dengan monomer. Polimerisasi adalah suatu proses memproduksi polimer dari unit-unit monomer melalui reaksi kimia. Reaksi ini dapat menghasilkan polimer linear atau polimer silang. Titik lebur polimer tidak pernah didefinisikan sebagai satu titik, tetapi dalam suatu *range* yang disebut *melting interval* (Nicholson, 1997).



(a) Linear Macromolecule; (b) Branched Macromolecule; (c) Crosslinked Macromolecule

Gambar 2.1. Bentuk Dasar Struktur Macromolecule

(Sumber : Zhang, 2004. *Tribology of Elastomers*)

Polimer telah diklasifikasikan berdasarkan respon mereka terhadap perlakuan panas. Klasifikasi tersebut antara lain : *Thermoplastic*, *Elastomers*, dan *Thermosetting*. Golongan *Thermoplastic* (*Polyethylene* (PE), *Polystyrene* (PS), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), *Polycarbonate* (PC), *Polyvinyl Chloride* (PVC)) akan meleleh ketika dipanaskan dan mengeras kembali jika didinginkan. *Elastomers* adalah golongan polimer yang dapat diregangkan dengan mudahnya

dan akan kembali ke bentuk semula jika dilepaskan. Sedangkan *Thermosetting* (*Bakelite*, *Vulcanized Rubber*, *Polyester Resins*, *Epoxy Resins*, *Polyimide* (PI), dan *Polyurethanes* (PU)) adalah jenis polimer yang secara normal lebih keras (*rigid*), getas (*brittle*) dan tidak dapat dilunakkan meski diberi perlakuan panas (V. Kumar, dkk. 2016).

Tabel 2.1. Jenis Karet yang Digunakan dalam Kehidupan Sehari-hari
(Sumber : Zhang, 2004. *Tribology of Elastomers*)

<i>Kinds of Rubber</i>	<i>Shore-Hardness</i>	<i>Tensile Strength (Mpa)</i>	<i>Maximum Service Temperature (°C)</i>	<i>Glass Transition Temperature (°C)</i>
<i>Isobutylene-Isoprene Rubber</i>	30 - 100	21	149	-75
<i>Chloroprene Rubber</i>	40 - 95	21	116	-49
<i>Nitrile Rubber</i>	20 - 90	21	149	-22
<i>Silicone Rubber</i>	10 - 85	7	316	-120
<i>Polyurethane</i>	10 - 100	34	116	-
<i>Natural Rubber</i>	30 - 100	25	70	-70
<i>Ethylene Propylene Rubber</i>	30 - 90	10	125	-58
<i>Polybutadiene</i>	35 - 90	10	70	-85

2.6. Elastomers

Menurut J. Walker (2012) pada bukunya yang berjudul *Elastomer Engineering Guide*, dipaparkan bahwa karet pertama kali dibawa ke Eropa pada tahun 1493 dari Amerika. Ketertarikan manusia terhadap karet bermula pada tahun 1770 ketika Joseph Priestley mampu menghapus goresan pensil dengan menggunakan karet atau yang kita kenal saat ini dengan nama karet penghapus. Perkembangan material karet semakin pesat pada abad ke-19. Karet mulai digunakan dalam berbagai hal seperti *elastic bands*, *flexible tubing*, dan *water proofing* yang dikembangkan oleh Macintosh dan Thomas Hancock.

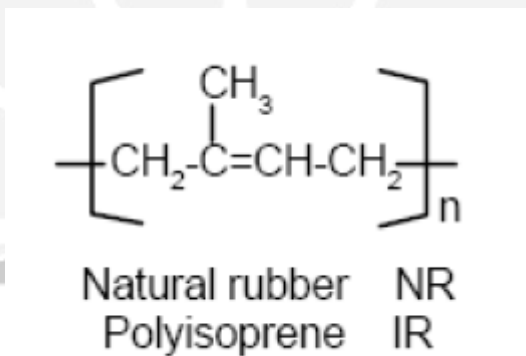
Vulkanisir pertama kali dikembangkan oleh Charles Goodyear dengan menggunakan *sulphur* (belerang). Teknik tersebut diketahui mampu menambah kekuatan dan durabilitas dari karet yang bertekstur lembut menjadi material yang lebih kokoh.

Semakin banyak penggunaan karet tersebut maka permintaan akan bahan alam tersebut semakin bertumbuh secara drastis. Amerika Selatan, lebih tepatnya Brazil, merupakan sumber karet alam yang paling utama sampai pada awal tahun

1900. Semakin berjalannya waktu, munculah karet sintetis sebagai pengganti karet alam seperti *Sodium Polymerised Butadiene*, dan *Styrene-Butadiene Rubber* (SBR). Munculnya karet sintetis ini telah melampaui produksi karet alam pada awal tahun 1960. Pada tahun 1990, hampir seluruh dunia telah mampu memproduksi karet sintetis.

2.6.1. *Natural Rubber* (Karet Alam)

Karet alam didapatkan dari getah (*latex*) tanaman karet yang dihasilkan melalui proses koagulasi dengan bahan kimia, pengeringan, pembersihan, dan pencampuran (*Blending*). Karet alam cenderung mengkristal secara spontan pada suhu rendah atau ketika ditarik karena ikatan strukturalnya yang tinggi. Kristalisasi pada suhu rendah menyebabkan munculnya sifat kaku (*stiffness*). Kristalisasi ini memberikan karet alam kekuatan tarik yang tinggi dan ketahanan terhadap pemotongan.



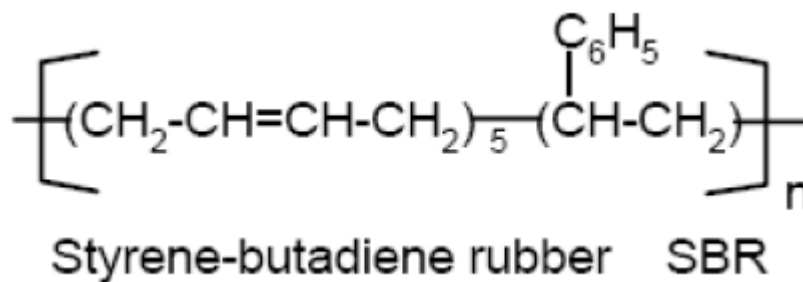
Gambar 2.2. Struktur Kimia Karet Alam
(Sumber : J. Walker, 2012. *Elastomer Engineering Guide*)

Elastisitas adalah sifat karet yang paling mendasar, memberi sifat unik yang mampu membuatnya terdistorsi dan kembali ke bentuk semula setelahnya, akan tetapi tidak sepenuhnya elastis. Bagian yang terdistorsi pulih lebih lama dibandingkan bagian yang lainnya. Gaya eksternal akan terfokus pada satu bagian pada titik tertentu dan mengakibatkan bagian tersebut pulih lebih lama. Tingkat distorsi permanen ini disebut *permanent set*, tergantung dari besar gaya dan durasi gaya tersebut diterapkan. Semakin besar gaya yang diterapkan dan semakin lama maka semakin besar pula *permanent set* yang terjadi pada karet. Kejadian ini dapat ditemukan pada *sealant* atau *gasket*. *Sealant* akan mengendur

pada waktu tertentu akibat munculnya bagian yang tidak dapat pulih kembali ke keadaan semula, yaitu *permanent set*.

2.6.2. *Styrene-Butadiene Rubber (SBR)*

Polimer *Styrene-Butadiene Rubber (SBR)* secara luas diproduksi dengan cara polimerisasi larutan dan emulsi (*Emulsion Polymerization*). Polimerisasi emulsi dilakukan baik dalam keadaan panas (50°C) ataupun dingin (5°C). SBR yang dibuat dengan cara emulsi biasanya mengandung sekitar 23% *Styrene* yang tersebar secara acak dengan *Butadiene* dalam rantai polimernya. SBR yang dibuat dalam polimerisasi larutan mengandung jumlah *Styrene* yang sama dengan *Butadiene*, namun tersebar secara acak dalam rantai polimernya. *Styrene* merupakan *Thermoplastic* dan ketika diproses pada temperatur tertentu dapat melembutkan dan menghaluskan permukaan elastomer.



Gambar 2.3. Struktur Kimia *Styrene-Butadiene Rubber (SBR)*

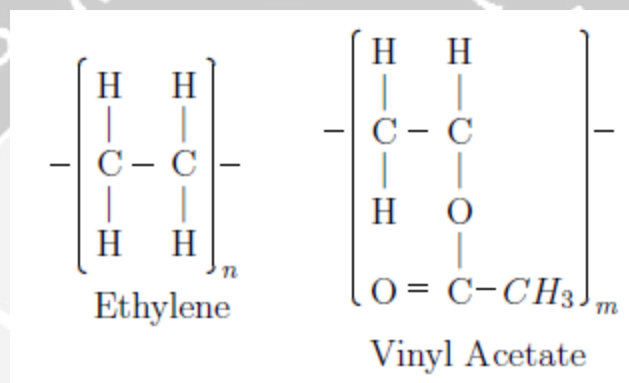
(Sumber : J. Walker, 2012. *Elastomer Engineering Guide*)

SBR awalnya diproduksi dengan metode emulsi dalam keadaan panas (*Hot Emulsion*), dan karakteristiknya sulit untuk difabrikasi jika dibandingkan dengan karet alam (*Natural Rubber*). Muncul pengembangan yang signifikan pada SBR sehingga karakteristiknya semakin baik dan mumpuni untuk difabrikasi dengan cara penambahan minyak.

SBR yang diproduksi dalam keadaan dingin umumnya memiliki berat molekul rata-rata yang lebih tinggi dan distribusi berat molekul yang lebih kecil jika dibandingkan dengan metode dalam keadaan panas. Hal tersebut mengakibatkan SBR yang diproduksi dalam keadaan dingin memiliki ketahanan aus, ketahanan terhadap uji tarik yang lebih tinggi, dan *Young's Modulus* yang lebih tinggi pula jika dibandingkan dengan SBR yang diproduksi dalam keadaan panas.

2.6.3. Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Rubber Foam

Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) adalah suatu kopolimer yang terbentuk dari monomer *Ethylene* dan *Vinyl-Acetate* (VA) dengan resin dan sifat-sifat material karet sehingga dapat diaplikasikan ke dalam produk tertentu. Muncul banyaknya artikel mengenai penggunaan EVA dalam industri alas kaki (*footwear*), termasuk *outsole* dan *insole*. Material EVA memiliki beberapa kelebihan, di antaranya material ini memiliki kekuatan terhadap suhu rendah, ketahanan terhadap *crack* ketika diregangkan, dapat menjadi perekat ketika dilelehkan, dan kedap air. (J. M. Dias, 2014).



Gambar 2.4. Struktur Kimia EVA

(Sumber : R. Verdejo, 2003. *Gas Loss and Durability of EVA Foams Used in Running Shoes*)

2.7. Material Elastic

Menurut J. Walker (2012) pada bukunya yang berjudul *Elastomer Engineering Guide*, pada halaman 4 dipaparkan bahwa *elastomers* didasarkan pada polimer yang memiliki sifat elastis. Mereka tersusun atas rantai atom, terutama Karbon, Hidrogen, dan Oksigen yang membentuk suatu ikatan *Cross-Linking*. Ikatan inilah yang membuat elastomer kembali ke bentuk semula ketika gaya yang mengakibatkan terjadinya deformasi dihilangkan. Elastomer dapat dikatakan sebagai material yang paling serbaguna karena perilaku material yang tidak sama seperti plastik dan logam, terutama dalam menerima gaya eksternal yang mengakibatkan mereka terdeformasi dan kemampuan untuk memulihkan diri setelah beban tersebut dihilangkan (sifat elastisitas).

Elastisitas adalah kemampuan suatu material untuk kembali ke bentuk aslinya dan ke ukuran semula setelah diregangkan, dikompresi, dipuntir, dan dibengkokkan.

Deformasi elastis hanya berlangsung selama material tersebut diberi gaya eksternal, dan menghilang setelah gaya tersebut dihilangkan.

Sifat elastis elastomer muncul dari kemampuan rantai polimer untuk mengkonfigurasi ulang susunan rantai mereka ketika diberi suatu gaya. Ikatan silang (*Cross-Linked*) antar rantai monomer satu dengan rantai monomer yang lainnya memastikan bahwa elastomer kembali ke bentuk semula ketika gaya dihilangkan.

2.8. Diabetes

Diabetes Mellitus (DM) merupakan suatu kelompok penyakit metabolik dengan karakteristik hiperglikemia yang terjadi karena kelainan sekresi insulin, kerja insulin atau keduanya (*American Diabetes Association*, 2017 ; Suzanna Ndraha, 2014). Menurut *American Diabetes Association* (2017), DM terbagi menjadi beberapa klasifikasi antara lain :

- Tipe 1 : Terjadi akibat adanya kerusakan sel β karena *autoimmune*, biasanya mutlak menyebabkan kekurangan insulin.
- Tipe 2 : Terjadi hiperinsulinemia tetapi insulin tidak bisa membawa glukosa masuk ke dalam jaringan karena terjadi resistensi insulin yang merupakan turunya kemampuan insulin untuk merangsang pengambilan glukosa oleh jaringan perifer dan untuk menghambat produksi glukosa oleh hati.
- *Gestational Diabetes Mellitus* : Terjadi selama masa kehamilan, di mana intoleransi glukosa didapati pertama kali pada masa kehamilan. Didiagnosis pada trimester kedua atau ketiga pada masa kehamilan.
- Tipe lain dengan penyebab-penyebab tertentu

Pada DM yang tidak dapat terkendali, dapat terjadi komplikasi metabolik akut maupun komplikasi vaskuler kronik, baik mikroangiopati maupun makroangiopati. DM merupakan penyebab utama dari *end-stage renal disease* (ESRD), *nontraumatic lowering amputation*, dan *adult blindness* di Amerika Serikat. Sejak ditemukannya insulin, angka kematian penderita DM akibat komplikasi menurun

drastis (S. Ndraha, 2014). Komplikasi kronis yang dapat terjadi akibat DM yang tidak dapat terkendali antara lain :

- Kerusakan saraf (Neuropati)
- Kerusakan ginjal (Nefropati)
- Kerusakan mata (Retinopati)
- Jantung koroner
- *Stroke*
- Hipertensi
- Penyakit pembuluh darah perifer
- Gangguan hati
- Penyakit paru-paru
- Gangguan saluran cerna
- Infeksi

Masalah kaki diabetik juga menjadi masalah utama pasien DM dan menyebabkan mereka harus menjalani rawat inap apabila sudah terlalu parah. Sebagian besar masalah kaki tersebut muncul dari dua komplikasi di atas yaitu kerusakan saraf dan minimnya sirkulasi darah.

Kerusakan saraf dapat menyebabkan kaki tidak dapat mengirimkan *impuls* ke otak sehingga penderita DM tidak dapat merasakan apa yang terjadi atau dialami oleh kaki mereka. Sebagian besar penderita DM mengalami hal tersebut. Luka kecil yang diakibatkan oleh benda apapun akan menjadi masalah besar di kemudian hari.

DM juga merusak pembuluh darah, mengurangi aliran darah ke kaki. Sirkulasi yang buruk ini menyebabkan terjadinya disintegrasi tulang dan sendi kaki dan pergelangan kaki. Akibatnya, para penderita memiliki resiko yang tinggi dan rentan terhadap patah tulang di bagian kaki. Kondisi ini dapat menyebabkan kerusakan struktur tulang kaki, dan hal ini merupakan masalah yang serius bagi para penderitanya.

2.9. Material Properties

2.9.1. Mass Density

Mass Density atau dikenal dengan massa jenis merupakan karakteristik dari suatu entitas atau zat (*American Chemical Society*, 2016). Massa jenis dari suatu zat merupakan hubungan antara massa dari zat tersebut dan volumenya. Massa

atom, ukurannya dan bagaimana susunannya mempengaruhi massa jenis. Massa jenis dilambangkan dalam huruf Yunani, ρ (rho). Persamaan matematis dari massa jenis adalah:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.1)$$

Keterangan :

ρ : Massa Jenis (Kg / m³)

m : Massa (Kg)

v : Volume (m³)

Setiap jenis material yang berbeda memiliki massa jenis yang berbeda pula. Massa jenis akan menentukan beberapa sifat material seperti kemampuan untuk mengapung, kemurnian material dan penanganannya.

2.9.2. Deformasi dan Modulus Elastisitas (*Young's Modulus*)

Deformasi adalah perubahan bentuk yang disebabkan oleh suatu gaya yang diaplikasikan pada benda tertentu. Selama proses deformasi, material penyusun benda tersebut menyerap energi akibat gaya yang diaplikasikan. Perubahan bentuk secara fisik terbagi menjadi dua antara lain deformasi plastis dan deformasi elastis.

Terjadi deformasi elastis pada awal pembebanan sampai pada titik tertentu maka benda akan mengalami deformasi plastis. Pada pembebanan di bawah *yield point* (titik luluh), sebuah benda akan kembali ke bentuk semula. Kejadian tersebut diakibatkan oleh sifat elastis dari material benda tersebut. Pembebanan yang melebihi dari *yield point* ini akan mengakibatkan benda terdeformasi secara plastis sehingga benda tidak dapat kembali ke bentuk semula.

Elastisitas suatu material sangat ditentukan oleh modulus elastisitas (*Young's Modulus*). Modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tegangan dan tegangan. Persamaan matematika dari modulus elastisitas antara lain :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.1)$$

Keterangan :

E : Modulus Elastisitas

σ : Tegangan (MPa)

e : Tegangan

2.10. Von Misses Stress

Tegangan atau dalam istilah lain *stress*, adalah besaran pengukuran intensitas gaya atau reaksi yang timbul per satuan luas (DJ. Varnes, 1962). Tegangan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu *engineering stress* dan *true stress*. Tegangan dapat dinyatakan dalam Newton/mm² (MPa). Jika benda menerima beban tertentu, maka benda akan bertambah panjang dengan nilai tertentu. Saat itu juga, pada material terjadi tegangan yang disebut *engineering stress* yang dapat diformulasikan :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

Keterangan :

σ : Tegangan (Pa, N/m²)

F : Beban yang diberikan (N, Dyne)

A₀ : Luas penampang mula-mula (m²)

Teori yang dikembangkan oleh Richard Elder von Mises menyatakan bahwa sebuah benda pejal yang elastis (*ductile*) akan terdistorsi secara permanen atau luluh ketika kepadatan energi distorsi mencapai titik nilai kritis untuk material penyusun dari benda tersebut (DJ. Varnes, 1962). Titik tersebut dapat disebut *Yield Point* atau batas luluh.